

Ispitivanje integriteta površine titanijeve legure proizvedene aditivnim tehnologijama

Raguž, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:201589>

Rights / Prava: [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Raguž

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Ivan Raguž

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom prof. dr. sc. Darku Landeku na mentorstvu i vođenju prilikom pisanja ovog završnog rada te asistentu Josipu Pranjiću na pomoći oko literature. Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Gorani Baršić s Katedre za mjerenje i kontrolu, dr. sc. Mihi Klaiću s Katedre za alatne strojeve te prof. dr. sc. Vesni Alar i asistentu Marinu Kurteli s Katedre za zaštitu materijala koji su nam ustupili svoje laboratorije kako bi se provela ispitivanja u radu. Na kraju bih se zahvalio obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška ne samo kroz ovaj rad, nego tokom cijelog studiranja.

Ivan Raguz



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Raguž** Mat. br.: 0035205251

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje integriteta površine titanijeve legure proizvedene aditivnim tehnologijama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing the integrity of the titanium alloy surface produced by additive manufacturing**

Opis zadatka:

Primjenom iste vrste materijala postupcima aditivnih tehnologija mogu se proizvesti elementi konstrukcija smanjene mase u odnosu na konvencionalno proizvedene materijale uz zadržavanje iste nosivosti konstrukcije. Izrada konstrukcijskih elemenata aditivnim tehnologijama zahtjeva optimiranje oblika i dimenzija konstrukcije, pripremu i provedbu prikladnog aditivnog postupka i naknadnu obradu za postizanje potrebne kvalitete površine.

U radu treba opisati postupke selektivnog laserskog sinteriranja i pretaljivanja elektronskim snopom u izradi dijelova od praha titanijeve legure Ti6Al4V. U eksperimentalnom dijelu rada treba predložiti i provesti postupke završne obrade kojima će se postići kvaliteta površine prikladna za primjenu postupka prevlačenja prevlakama debljina manjih od 1 μm na uzorcima Ti6Al4V legure proizvedenim pretaljivanjem elektronskim snopom. Na obrađenim površinama provesti ispitivanja hrapavosti površine, mikrotvrdoće i analizu strukture stereomikroskopijom.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. TITANIJEVE LEGURE.....	2
2.1. Tehnički titanij.....	2
2.2. Titanijeve α i približno α legure	4
2.3. Titanijeve $\alpha + \beta$ legure	4
2.4. Titanijeve β legure	5
2.5. Primjena titanijevih legura u zrakoplovnoj industriji	5
2.6. Primjena titanija u brodogradnji	6
2.7. Primjena titanija u autoindustriji	7
2.8. Primjena u graditeljstvu	8
2.9. Primjena u biomedicini	8
2.10. Ostale primjene titanija	9
2.11. Obradivost titanijevih legura	9
3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE	11
3.1. Podjela postupaka aditivnih tehnologija	11
3.2. Primjena aditivne proizvodnje u izradi metalnih dijelova	13
3.2.1. Selektivno lasersko sinteriranje (eng. Selective Laser Sintering - SLS).....	14
3.2.2. Pretaljivanje snopom elektrona (eng. Electron Beam Melting-EBM).....	15
4. INTEGRITET I KARAKTERIZACIJA POVRŠINE.....	17
4.1. Hrapavost površine	18
4.2. Mikrotvrdoća	19
4.2.1. Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers	20
4.3. Stereomikroskopija	21
5. PRIPREMA UZORAKA I PROVEDBA ISPITIVANJA	22
5.1. Priprema uzoraka	22
5.2. Provedba ispitivanja.....	24
5.2.1. Stereomikroskopija	24
5.2.2. Ispitivanje parametara hrapavosti	24
5.2.3. Ispitivanje mikrotvrdoće	25
6. REZULTATI I DISKUSIJA.....	26
7. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA.....	30

PRILOZI 33

POPIS SLIKA

Slika 1. Kristalne strukture tehnički čistog titanija [1].....	2
Slika 2. Dijagrami stanja binarnih titanijevih legura [1]	3
Slika 3. Primjeri primjene titanijevih legura: a) dijelovi mlaznog motora; b) precizno lijevani dijelovi helikoptera; c) precizno lijevana ispušna cijev pomoćnog ustava napajanja; d) precizno lijevano kućište ventilatora plinske turbine [1].....	5
Slika 4. Primjeri primjene titanijevih legura za dijelove nosača motora zrakoplova Airbus A380 [1].....	6
Slika 5. Ruska podmornica Lira-705 čiji je trup konstruiran od titana [5].....	7
Slika 6. Akrapovićeve ispušni sustav od titanijevih legura [7]	7
Slika 7. Shematski prikaz implantanata za bedro i koljeno [9].....	8
Slika 8. Kontinuirano odvojena čestica konvencionalno proizvedene Ti6Al4V legure	10
Slika 9. Podjela aditivne proizvodnje [11].....	11
Slika 10. Prototip kamere [11]	12
Slika 11. Prototip žiga za proizvodnju poklopca ruža za usne [11]	12
Slika 12. Maskica za <i>iPhone</i> dobivena postupkom izravne proizvodnje [10]	13
Slika 13. Mogućnost rasporeda osnovnog materijala i veziva u prahu [11].....	14
Slika 14. Shema uređaja za pretaljanje snopom elektrona [11]	16
Slika 15. Karakteristične duljine [16].....	19
Slika 16. Skica indentora i otiska Vickersove metode [19].....	20
Slika 17. Uzorak legure Ti6Al4V u neobrađenom stanju proizveden postupkom EBM	22
Slika 18. Fino tokarenje uzorka aditivno proizvedene legure Ti6Al4V	23
Slika 19. Stereomikroskop Leica MZ6 i računalo s programom za obradu slike s mikroskopa	24
Slika 20. Uređaj Williams-Wolpert Tukon 2100B s računalnim programom za mjerenje udaljenosti dijagonala.....	25
Slika 21. Legura Ti6Al4V proizvedena EBM postupkom u neobrađenom stanju, povećanje x7,33	26
Slika 22. Legura Ti6Al4V proizvedena EBM postupkom nakon finog tokarenja, povećanje x31,3	26
Slika 23. Profil hrapavosti fino tokarene legure Ti6Al4V legure proizvedene postupkom EBM	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva čistog titanija [2]	2
Tablica 2. Parametri SLS postupka koji utječu na svojstva proizvoda [11]	15
Tablica 3. Uzroci promjene integriteta površine [15]	18
Tablica 4. Kemijski sastav legure TiAl6V4 [21]	22
Tablica 5. Mikrotvrdoća legure Ti6Al4V proizvedene EBM postupkom i konvencionalno proizvedene legure	27
Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti	27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m^3	Gustoća
E	GPa	Modul elastičnosti
ν	-	Poissonov omjer
G	GPa	Modul smičnosti
R_m	MPa	Vlačna Čvrstoća
R_a	μm	Srednji korak elementa profila
R_z	μm	Navjeća visina neravnina
R_p	μm	Najveća visina vrha profila
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
F	N	Sila
S	cm^2	Površina
a_p	mm	Dubina rezanja
V_c	mm/min	Brzina rezanja
f	mm	Posmak

SAŽETAK

U radu je istražen integritet površine legure Ti6Al4V proizvedene pretaljivanjem snopom elektrona i obrađene odvajanjem čestica. Provedena su ispitivanja mikrotvrdoće, hrapavosti površine i analiza izgleda površine stereomikroskopijom. Ispitivanja integriteta obrađene površine potvrdila su dobru obradivost pretaljene površine odvajanjem čestica, ali ipak još nedovoljno nisku hrapavost za nanošenje tankih tvrdih prevlaka.

Ključne riječi:

titanijeve legure, Ti6Al4V, aditivne tehnologije, pretaljivanje snopom elektrona, integritet površine

SUMMARY

The thesis investigates the surface integrity of the Ti6Al4V alloy produced by electron beam melting and treated by particle separation. Examinations of microhardness, surface roughness and analysis of surface appearance by stereomicroscopy were performed. Integrity tests of the treated surface confirmed the good machinability of the remelted surface by particle separation, but still insufficiently low roughness for the application of thin hard coatings.

Key words:

Titanium alloys, Ti6Al4V, additive manufacturing, electron beam melting, surface integrity

1. UVOD

Za industrijsku primjenu aditivno proizvedenih metalnih dijelova najznačajniji su postupci selektivnog laserskog sinteriranja (eng. *Selective Laser Sintering* - SLS) i pretaljivanja snopom elektrona (eng. *Electrone Beam Melting* - EBM). Ovi se postupci sve više koriste zbog mogućnosti izrade dijelova koji se ne mogu proizvesti konvencionalnim postupcima sa zahtijevanim smanjenjem mase, mehaničkim, korozivskim i drugim svojstvima. SLS ili EBM proizvedeni dijelovi uobičajeno su grube i hrapave površine zbog koje je potrebno provesti dodatne obrade odvajanjem čestica, brušenjem, poliranjem, toplinske obrade te po potrebi zaštitu površina prevlakama ili premazima.

U radu će se provesti ispitivanje površinskih svojstava Ti6Al4V legure dobivene sinteriranjem snopom elektrona i potom obrađene finim tokarenjem na CNC obradnom centru u cilju ispitivanja prikladnosti obrađene površine za primjenu postupaka prevlačenja tankim tvrdim prevlakama.

2. TITANIJEVE LEGURE

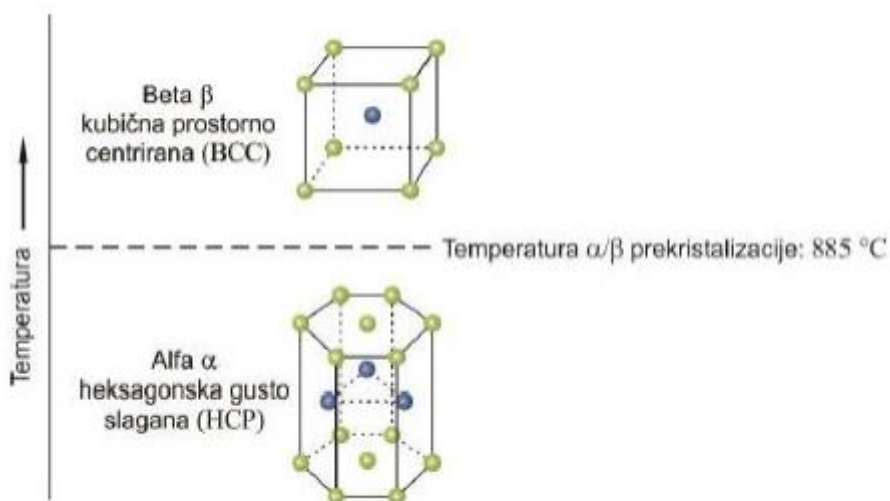
2.1. Tehnički titanij

Titanij je polimorfan metal koji se javlja u dva kristalna oblika. Jedan je stabilan pri sobnoj temperaturi s heksagonskom, gusto slaganom strukturom (HCP), a naziva se α -titanij. Drugi polimorfni oblik titanija stabilan je na povišenim temperaturama i pojavljuje se u obliku kubične prostorno centrirane (BCC) strukture, poznat kao i β -titanij [1]. Neka od svojstava čistog titanija prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva čistog titanija [2]

Naziv svojstva	Vrijednost
Gustoća, ρ , kg/m^3	4430
Modul elastičnosti, E , GPa	110
Poissonov omjer, ν	0,3
Modul smičnosti, G , Gpa	44
Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	800 – 900

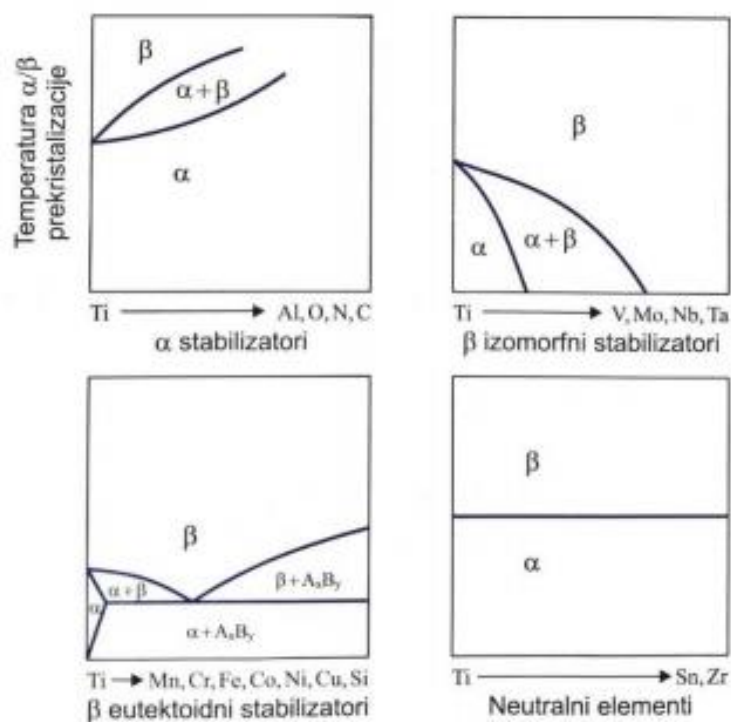
Kod tehnički čistog titana α faza je stabilna sve do temperature od 885 °C na kojoj se transformira u β fazu, koja ostaje nepromijenjena sve do tališta na temperaturi od 1670 °C. Komercijalno nabavljiv čisti titanij uobičajeno sadrži isključivo α fazu [1].



Slika 1. Kristalne strukture tehnički čistog titanija [1]

Tehnički čisti metali, kao i titanij, zbog slabijih mehaničkih, korozijskih i triboloških svojstava uglavnom nisu prikladni za konstrukcijsku primjenu te ih je radi poboljšanja svojstava potrebno legirati i toplinski obrađivati.

Dodatkom legirnih elemenata čistom titaniju mijenjaju se udjeli α i β faze te temperatura α/β pretvorbe (slika 2). Elementi koji povisuju temperaturu α/β prekrystalizacije kroz stabilizaciju α faze nazivaju se α stabilizatorima i uključuju Al, O, N i C. Elementi koji snižavaju temperaturu α/β prekrystalizacije i time stabiliziraju β fazu pri nižim temperaturama nazivaju se β stabilizatori. β stabilizatori se naknadno dijele na β izomorfne stabilizatore, koji imaju visoku topljivost u titanu i β eutektoidne elemente, ograničene topljivosti koji stvaraju intermetalne spojeve. β izomorfni elementi jesu Mo, V, Nb i Ta, β eutektoidni elementi jesu Mn, Cr, Si, Fe, Co, Ni i Cu. Legirni elementi Sn i Zr spadaju u skupinu neutralnih elemenata jer ne utječu na temperaturu α/β prekrystalizacije [1].



Slika 2. Dijagrami stanja binarnih titanijevih legura [1]

Titanijeve legure općenito se klasificiraju prema sadržaju α i β faze u njihovoj mikrostrukturi na sobnoj temperaturi. Prema mikrostrukturi razlikuju se α , približno α , $\alpha+\beta$ i metastabilne β legure [1].

2.2. Titanijeve α i približno α legure

Titanijeve α legure ne sadrže β fazu dok približno α legure sadrže uglavnom α fazu, uz tek neznatnu količinu β faze kao rezultat prisutnosti uglavnom željeza, a ponekad i nekih drugih β stabilizatora. Ove legure sadrže većinom 5 % do 6 % Al kao glavnog legirnog elementa uz dodatak neutralnih elemenata Sn i Zn te nekih β stabilizatora. Koriste se za visokotemperaturne primjene zbog visoke otpornosti na puzanje koja se povećava dodatkom silicija. Zbog gusto naslagane HCP strukture titanijeve α legure imaju dobru žilavost i čvrstoću pri niskim temperaturama. Nemoguće ih je toplinski očvrnuti, teško ih je oblikovati, ali su dobro zavarljive. Osrednje su čvrstoće te imaju dobru lomnu žilavost, uz dobru otpornost na puzanje na temperaturama od 315 °C do 590 °C. Glavni legirni element titanijevih α legura je aluminij koji otapanjem u kristalnoj rešetci titanija povećava čvrstoću i smanjuje gustoću legure. U α titanijevim legurama maseni udio aluminija se ograničava na 6 %, jer pri većim koncentracijama dolazi do opasnosti od pojave krhke intermetalne faze Ti_3Al . Jedina legura sa širokom komercijalnom primjenom iz skupine α legura je Ti-5Al-2,5Sn. Glavne prednosti ove legure jesu slijedeće: otpornost na koroziju i oksidaciju te dobra lomna žilavost pri niskim temperaturama zbog HCP strukture [1].

2.3. Titanijeve $\alpha + \beta$ legure

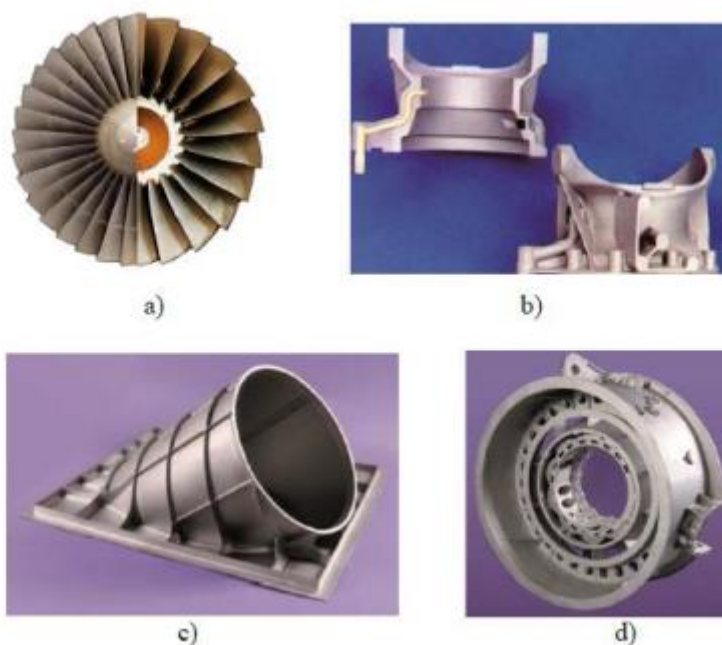
Legure ove skupine posjeduju dobru kombinaciju mehaničkih svojstva čvrstoće, žilavosti i duktilnosti te su upravo zbog toga najvećim dijelom zastupljene u proizvodnji titanovih legura. Ove legure se dijele na legure koje sadrže samo β stabilizatore i one koje uz to sadrže i elemente koji stabiliziraju α fazu. Dok kod legura koje sadrže samo β stabilizatore očvršćuje samo β faza dodavanjem i alifagenih elemenata uz β stabilizatore očvršćuje i α faza tako da se dodavanjem alifagenih elemenata dobivaju najviše vrijednosti vlačne čvrstoće. Titanijeve $\alpha + \beta$ legure primjenjuju se na temperaturama između 315 °C do 400 °C. Može ih se očvrnuti homogenizacijskim žarenjem i dozrijevanjem, ali im se čvrstoća smanjuje s povećanjem debljine konstrukcijskog elementa. Najpoznatija legure iz skupine $\alpha + \beta$ legura je Ti6Al4V. U ovoj leguri Al djeluje stabilizirajuće na α fazu a V na β fazu [1].

2.4. Titanijeve β legure

Uz dovoljan sadržaj β stabilizatora β faza se stabilizira na sobnoj temperaturi. Legure iz ove skupine su bolje oblikovljive od ostalih skupina titanijevih legura jer β faza kristalizira u BCC kristalnoj rešetci, koja ima puno veću sposobnost deformacije od HCP kristalne rešetke u kojoj kristalizira α faza. Još neke prednosti ovih legura su visoka prokaljivost i visoka lomna žilavost. Zbog legiranja β stabilizatorima (Cr, Mo, V i Nb) povećava se gustoća legure što je njen glavni nedostatak. Uz to nedostaci su smanjena žilavost nakon procesa toplinske obrade, a neke legure su ograničeno zavarljive. Pri povišenim temperaturama u mikrostrukturi β legure počinje precipitacija α faze pa se ne primjenjuju na temperaturama iznad 370 °C [1].

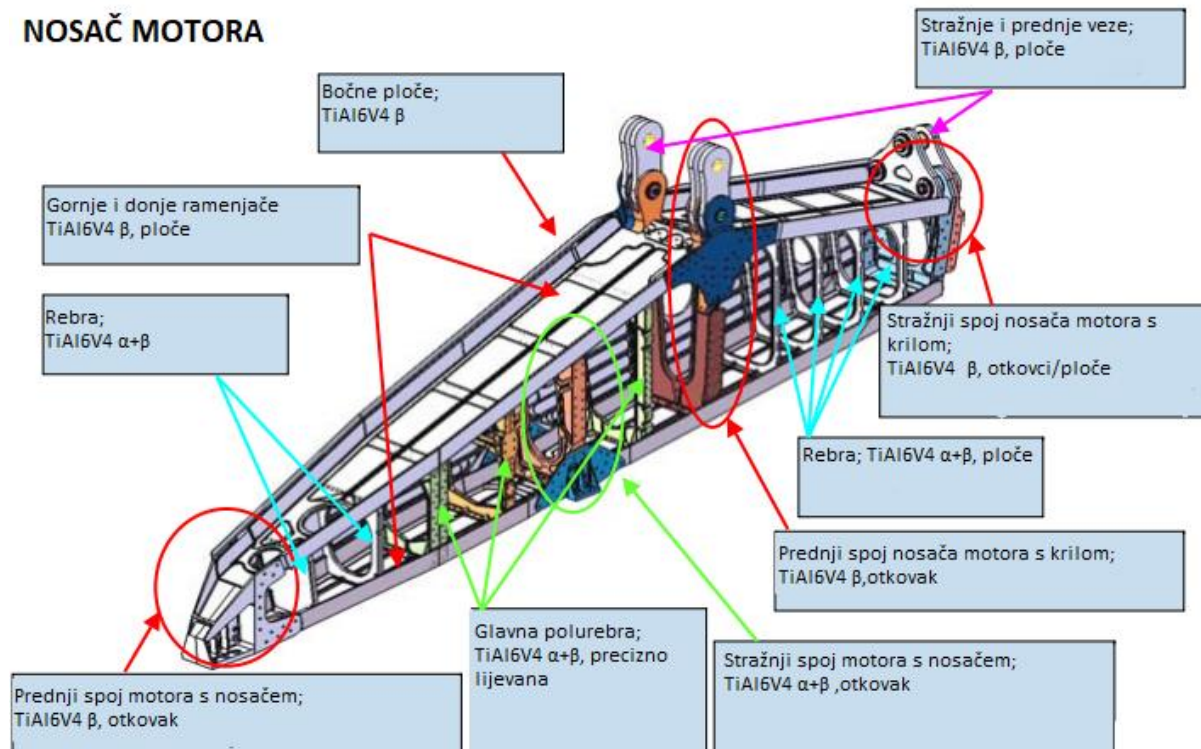
2.5. Primjena titanijevih legura u zrakoplovnoj industriji

Titanijeve legure ugrađuju se u dijelove zrakoplovnih okvira i dijelova zrakoplovnih motora zbog svoje relativno niske gustoće u odnosu na čvrstoću (gustoća 60% od gustoće čelika) te zbog kompatibilnosti sa polimernim kompozitima ojačanim ugljičnim vlaknima [3]. Na slici 3 prikazani su primjeri dijelova zrakoplova izrađeni od titanijevih legura.



Slika 3. Primjeri primjene titanijevih legura: a) dijelovi mlaznog motora; b) precizno lijevani dijelovi helikoptera; c) precizno lijevana ispušna cijev pomoćnog ustava napajanja; d) precizno lijevano kućište ventilatora plinske turbine [1]

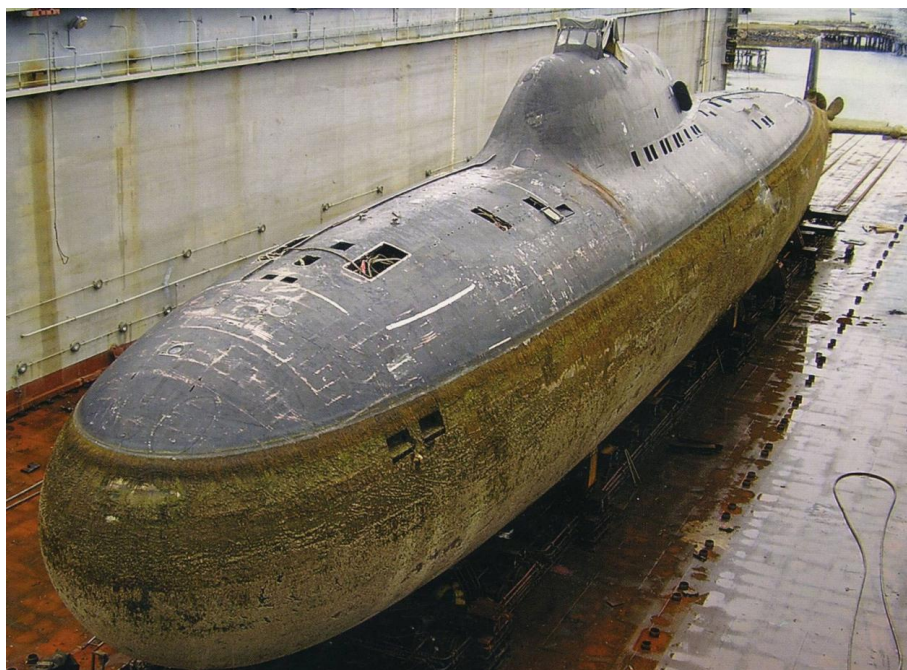
Veliki udio u upotrebi legura u zrakoplovnoj industriji ima legura Ti6Al4V koja se koristi za izradu nosača motora (slika 4.), zbog dobrih svojstava čvrstoće, žilavosti, otpornosti na puzanje i dobre obradivosti. Zbog zadržavanja dobrih mehaničkih svojstava na temperaturama do oko 300 °C legura Ti6Al4V koristi se za dijelove motora poput lopatica i kućišta ventilatora [3].



Slika 4. Primjeri primjene titanijevih legura za dijelove nosača motora zrakoplova Airbus A380 [1]

2.6. Primjena titanija u brodogradnji

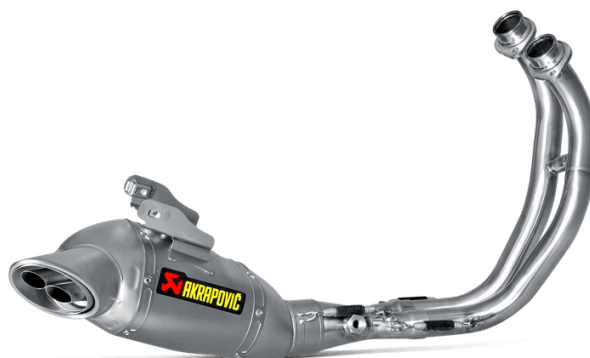
Zbog prisutnosti kloridnih iona u okolišu morske vode koji djeluju korozivno na konstrukciju zahtjevi na koroziju su prilično visoki. Zbog toga se pribjegava korištenju titanijevih legura u brodogradnji (slika 5). Osim korozijske otpornosti prema morskoj vodi titanijeve legure pokazuju i dobru otpornost koroziji medijima poput nafte i zemnog plina pa se mogu koristiti i kao oplata tankerskih spremnika. Također zbog svoje otpornosti na propagaciju pukotina, primjenom titanijevih legura može se povećati maksimalnu dubinu zarona podmornica [4].



Slika 5. Ruska podmornica Lira-705 čiji je trup konstruiran od titana [5]

2.7. Primjena titanija u autoindustriji

Slično kao i kod primjene u zrakoplovnoj industriji težnja autoindustrije je smanjenje mase vozila što će se direktno odraziti na smanjenje potrošnje goriva koje je ograničeno ekološkim zahtjevima, ali i na smanjenje trošenja nekih dijelova vozila uslijed smanjenja dinamičkih sila. Zbog svojih svojstava visoke čvrstoće, manje gustoće i dobre otpornosti na pojavu loma titanijevе legure koriste se za proizvodnju usisnih ventila i njihovih opruga te dijelova ispušnog sustava (slika 6).



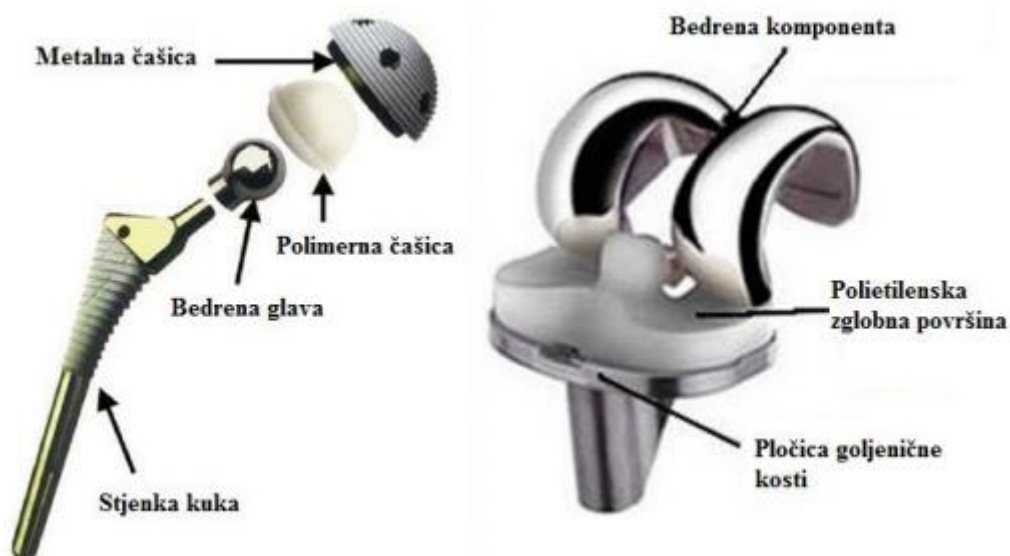
Slika 6. Akrapovičev ispušni sustav od titanijevih legura [7]

2.8. Primjena u graditeljstvu

Svoju primjenu u graditeljstvu titanijeve legure uz već spomenuta svojstva male gustoće, visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju duguju i činjenici da je toplinski koeficijent rastezanja titanija i njegovih legura gotovo identičan granitu i staklu, a blizak koeficijentu toplinskog rastezanja betona. Zbog sposobnosti regeneracije površinskog oksidnog sloja titanijeve legure su otporne na opću koroziju uzrokovanu kiselim kišama i jamičastu (eng. *pitting*) koroziju [6].

2.9. Primjena u biomedicini

Glavna svojstva koja se traže od biomaterijala su da ne izazove nikakve štetne reakcije u organizmu nakon ugradnje u tijelo te dobra mehanička svojstva, dobra oseintegracija, visoka otpornost na koroziju i trošenje [9]. Na slici 7 shematski je prikazan implantat umjetnog kuka u kojem se metalni dijelovi uobičajeno izrađuju od titanijevih legura.



Slika 7. Shematski prikaz implantanata za bedro i koljeno [9]

Kada se medicinski implantati ugrade u ljudsko tijelo događa se nekoliko reakcija između tijela domaćina i implantata i te reakcije nam govore je li materijal implantata biokompatibilan, odnosno prihvaćen od strane tijela domaćina. Stoga materijali implantata moraju imati ista ili slična svojstva tkivu u kojeg se ugrađuju [9]. Najvažnija mehanička svojstva prilikom izbora biokompatibilnog materijala su vlačna čvrstoća, tvrdoća, modul elastičnosti, istezljivost, lomna žilavost i dinamička izdržljivost. Osim biokompatibilnosti i

mehaničkih svojstava za uspješnu primjenu implantata važna je njegova otpornost na koroziju i otpornost na trošenje te oseointegracija.

Zahtjevi na korozijsku otpornost implantata su visoki iz razloga što se implantati nalaze u iznimno korozivnoj okolini ljudskog tijela što uključuje sve poznate tjelesne tekućine koje su bogate mnogim vrlo nagrizajućim ionima (npr. klor) i doticaj s proteinima. Stvaranjem pasivnog filma na površini legure titanij pokazuje odličnu korozijsku postojanost koja je pojačana legirnim elementima [9].

Za uspješnu primjenu titanijevih legura u izradi umjetnih kukova važno je svojstvo oseointegracije s koštanim tkivom primatelja. Oseointegracija je sposobnost implantata da se spoji s kostima i priležećim tkivima. Nesposobnost površine implantata da se integrira s priležećom kosti uslijed mikropokreta uzrokuje razlabavljenje implantata. Klinička medicinska istraživanja su pokazala da se povećanjem hrapavosti i modificiranjem površine implantata postiže bolje prijanjanje te veća oseointegracija [9]. Na slici 7 uočavaju se ohrapavljene površine na stijenci i čašici kuka s ciljem bolje oseointegracije u tijelu pacijenta.

Implantati titanijevih legura koji su u relativnom pokretu u odnosu na ostale dijelove tijela (zglobovi i kukovi) stvaraju krhotine zbog mehanizama trošenja koji djeluju u ovom okruženju. Opasnost predstavljaju nagomilane čestice trošenja koje mogu ostati zarobljene unutar tkiva ili mogu biti metabolički prenesene na neko drugo mjesto u tijelu gdje mogu stvarati neželjene posljedice [9].

2.10. Ostale primjene titanija

Proizvođači titanija i njegovih legura jako brzo pronalaze nova tržišta i primjenu svojih proizvoda. Tako je na primjer u Kini 2008. godine 13% od ukupne proizvodnje titanija utrošeno na proizvodnju sportske opreme i rekvizita. Titanij se također uspješno primjenjuje u industriji nakita gdje zbog svojih svojstava dobro parira skupim i rijetkim metalima [8].

2.11. Obradivost titanijevih legura

Obrada titanijevih legura pred inženjere donosi svoje specifične probleme i izazove. Slaba toplinska provodnost titanijevih legura znatno podiže temperaturu u blizini zone rezanja što za posljedicu ima brzo trošenje alatne oštrice, a zbog povišenja temperature mogu se javiti i problemi sa postizanjem tolerancija [10]. S većim udjelom β faze povećava se deformabilnost legure zbog BCC kristalne rešetke [1], ali to negativno utječe na obradivost odvajanjem

čestica zbog čega je odvojena čestica kontinuirana (Slika 8.). To se može izbjeći primjenom aditivnih tehnologija gdje je zbog svoje sitnije mikrostrukture odvojene čestice u praškastom obliku.



Slika 8. Kontinuirano odvojena čestica konvencionalno proizvedene Ti6Al4V legure

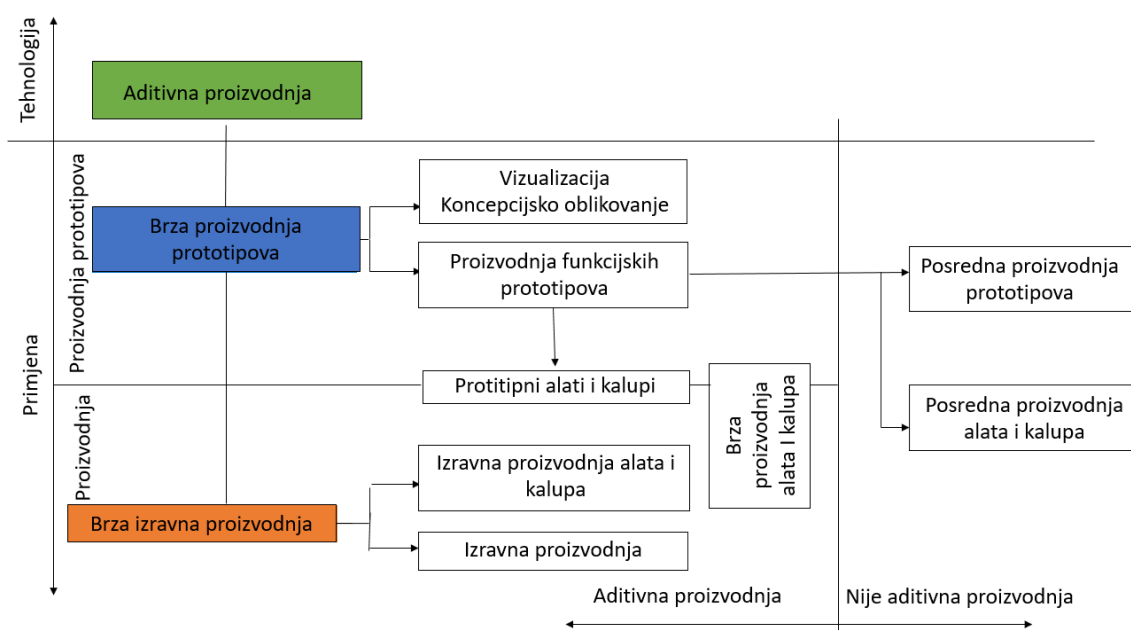
3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Glavna značajka postupaka aditivne tehnologije je dodavanje materijala, u slojevima dok se ne izradi cijela tvorevina. Takvim načinom izrade proizvoda moguća je izrada dijelova vrlo složene geometrije koje bi bilo iznimno teško ili nemoguće izraditi konvencionalnim postupcima [11].

3.1. Podjela postupaka aditivnih tehnologija

Postupci aditivne proizvodnje mogu se podijeliti na tri skupine (slika 9):

- 1) postupke brze proizvodnje prototipova (eng. *Rapid Prototyping*-RP)
- 2) postupke brze proizvodnje alata i kalupa (eng. *Rapid Tooling*-RT)
- 3) postupke brze (izravne) proizvodnje (eng. *Rapid Manufacturing*-RM) [10]



Slika 9. Podjela aditivne proizvodnje [11]

Postupkom brze proizvodnje prototipova velikom brzinom se dobivaju prototipovi koji mogu oponašati geometriju, materijal i funkciju budućeg proizvoda te se u ranoj fazi mogu otkriti

pogreške u dizajnu [11]. Na slici 10 prikazan je primjer prototipa kamere prikladan za istraživanje tržišta i ergonomska ispitivanja.



Slika 10. Prototip kamere [11]

Postupkom brze proizvodnje alata i kalupa proizvode se kalupi ili njihovi komplicirani dijelovi te je moguće otkriti nedostatke kalupa prije eksploatacije [11]. Na slici 11 prikazani su primjeri kalupa za injekcijsko prešanje izrađeni aditivnim postupcima.



Slika 11. Prototip žiga za proizvodnju poklopca ruža za usne [11]

Postupkom brze proizvodnje proizvodi se gotovi proizvod u serijskoj proizvodnji spreman za uporabu. Iako su ovi postupci ograničeni materijalima koji su raspoloživi za ovaj tip proizvodnje, kontinuirano se sintetiziraju novi materijali koji će biti prikladniji za ovaj tip proizvodnje [11]. Na slici 12 prikazan je primjer maske za *iPhone* izrađen postupkom izravne proizvodnje.



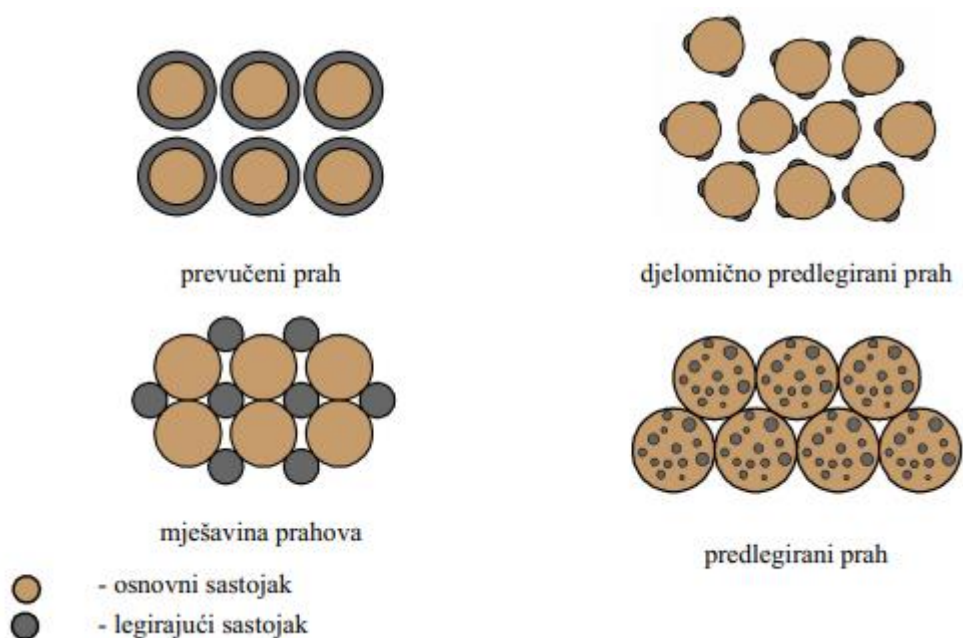
Slika 12. Maskica za *iPhone* dobivena postupkom izravne proizvodnje [10]

3.2. Primjena aditivne proizvodnje u izradi metalnih dijelova

Primjenom aditivnih tehnologija kod proizvodnje metalnih dijelova, metalni sirovac je u formi praha, a dijelovi se proizvode na način da se nanosi sloj po sloj metalne taljevine pomoću snopa elektrona ili laserske zrake. Kao i kod upotrebe aditivnih tehnologija s drugim materijalima konstrukcija dijelova započinje stvaranjem trodimenzionalnog (3D) modela primjenom računalom potpomognutog dizajna (eng. *CAD - Computer Aided Design*) ili se trodimenzionalni model stvara tehnikama reverzibilnog inženjerstva, npr. primjenom pomoću trodimenzionalnih čitača ili računalnom tomografijom (CT). Trodimenzionalni model se pretvara u .stl datoteku te ga rezajući algoritam podijeli u približno dvodimenzionalne slojeve okomite na smjer konstruiranja [11]. Za aditivnu proizvodnju metalnih dijelova najzanimljiviji su postupci selektivnog laserskog sinteriranja (eng. *Selective Laser Sintering - SLS*) i pretaljivanja snopom elektrona (eng. *Electron Beam Melting - EBM*).

3.2.1. *Selektivno lasersko sinteriranje (eng. Selective Laser Sintering - SLS)*

Kod SLS postupka rabi se mješavina praha ili u novije vrijeme jednokomponentni prah. Ako je prah višekomponentni, tada jedna komponenta ima više talište, a druga niže. Razlikuje se dva tipa srašćivanja prahova. Srašćivanje u čvrstom stanju obavlja se na temperaturama ispod tališta praha. Mehanizam povezivanja je difuzija jedne čestice u drugu. Budući je difuzija prilično spor mehanizam ovaj tip se uglavnom ne koristi. Drugi način srašćivanja je srašćivanje u kapljevitom stanju. Ideja je da se sastojak s nižim talištem dovede u kapljevito stanje te popuni prostor između čestica osnovnog materijala. Pri srašćivanju moguće su četiri vrste smjese osnovnog materijala i veziva prikazane na slici 13 [11].



Slika 13. Mogućnost rasporeda osnovnog materijala i veziva u prahu [11]

U slučajevima prevučenog praha i djelomično predlegiranog praha glavni nedostatak je nemogućnost postizanja jednolike debljine sloja legirajućeg elementa pa je i razdioba materijala nehomogena. Mješavine prahova u kojemu su čestice mehanički izmješane daju bolje rezultate, a najbolje rezultate daju prahovi koji su legirani prije samog sinteriranja iz razloga što je legirni element ravnomjerno raspoređen unutar jedne čestice osnovnog sastojka. [11].

Parametri procesa srašćivanja su promjenjivi i uvjetovani su svojstvima praška, kao što su površinska napetost i viskoznost te vrstom materijala koji se sinterira (tablica 2). Ako se poveća debljina sloja odnosno udaljenost između prolaza laserske zrake povećat će se i poroznost modela što uzrokuje pad tvrdoće i gustoće proizvoda. Smanjenje debljine sloja ograničeno je veličinom čestica tako da ne dođe do razmicanja prethodno nanešenih slojeva. Temperatura radnog prostora bi trebala biti malo ispod temperature taljenja elementa s nižim talištem, a povećanjem temperature olakšava se prodiranje kapljevite faze oko čvrste faze [11].

Tablica 2. Parametri SLS postupka koji utječu na svojstva proizvoda [11]

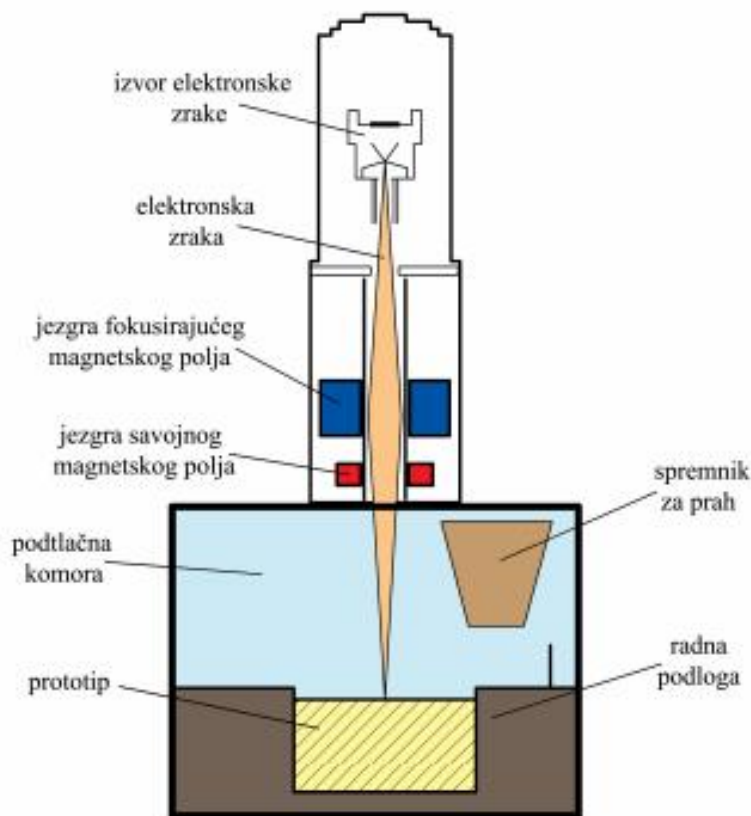
Parametri procesa	Svojstva materijala
<i>Upravljivi parametri</i>	Viskoznost
Parametri skeniranja laserske zrake	Površinske napetosti
Snaga lasera	Razdioba veličine čestica
Mehaničko nanošenje sloja praha	Oblik čestica
Atmosferski uvjeti srašćivanja	Upijanje/refleksivnost zračenja
Protok zraka	Toplinska provodnost
Grijala (zagrijavanje radnog prostora)	Specifični toplinski kapacitet
<i>Karakteristike uređaja</i>	Toplinska zračljivost
Vrsta lasera	Temperatura taljevine
Polumjer skeniranja	
<i>Geometrijski parametri</i>	
Vektor skeniranja	

Kod proizvodnje obradaka od legure Ti6Al4V koristi se iterbijski laser s temperaturama radne komore od 730 °C do 750 °C, a zaštitna atmosfera je ili plin argon ili vakuum [13][14].

3.2.2. Pretaljivanje snopom elektrona (eng. *Electron Beam Melting-EBM*)

Glavni koncept kod pretaljivanja snopom elektrona je da se proizvod gradi sloj po sloj taljenjem metalnog praha pomoću snopa elektrona (slika 14). Zbog moguće interakcije molekula zraka sa snopom elektrona postupak se provodi u vakuumskoj komori. Snop elektrona proizveden je iz katoda u elektronskom topu. Elektroni se emitiraju iz katode koja

se ugrijava na temperaturu oko 2500 °C, a zatim se u električnom polju ubrzavaju na polovinu brzine svjetlosti dok se snopom upravlja pomoću dva magnetna polja. Pvo polje djeluje kao magnetska leća i njome postiže fokus i željeni promjer snopa. Drugim poljem se snop usmjerava na željeno mjesto u radnoj komori. Sudaranjem elektrona s metalnim prahom dolazi do pretvorbe kinetičke energije elektrona u toplinsku energiju u zrcima praška koja uzrokuje taljenje praška [11].



Slika 14. Shema uređaja za pretaljivanje snopom elektrona [11]

Prednosti EBM postupka su velika gustoća energije, vrlo dobra mehanička svojstva koja se dobivaju zbog potlačne atmosfere pa nema stvaranja oksida i nitrida na površini obratka. Visoka brzina izrade dijelova, a zbog usmjeravanja elektrona nepokretnim dijelovima troškovi održavanja su niski. Nedostaci su potreba za podtlučnom atmosferom, prisustvo γ -zraka, a proizvodi su mogući samo od materijala koji provode električnu energiju [11].

4. INTEGRITET I KARAKTERIZACIJA POVRŠINE

Integritet (cjelovitost površine) predstavlja stanje površine na nekom obratku nakon što je na njemu primjenjen neki proizvodni postupak. Ukupnost je to svojstava topografije površine i svojstava površinskog sloja koji utječu na trajnost i eksploatacijske karakteristike sustava „površinski sloj - osnovni materijal“.

Ispitivanje topografije uključuje mjerenje profila površinske hrapavosti, teksture površine, parametara hrapavosti (horizontalnih i vertikalnih), valovitosti površine, zareza i oštećenja površine te površinskih pukotina dok se ispitivanjem svojstava površinskog sloja mjere metalurška i mehanička svojstva poput mikrostrukturnih svojstava (vrsta, udjeli i raspored faza), mikrotvrdoća, dubina difuzijske zone, zaostala naprezanja, otpornost na trošenje, otpornost na kontaktne pritiske, otpornost na umor površine i otpornost na toplinski umor, fizikalna svojstva kao što su faktor trenja, optička svojstva, kut kvašenja kapljevina i emisivnost toplinskog zračenja, kemijska svojstva kao što su otpornost na koroziju, otpornost na oksidaciju, otpornost na upijanje kapljevina, korozijski potencijal, te biološka svojstva kao što su biokompatibilnost i oseointegracija. [15].

Razlozi zbog kojih je potrebno provoditi ispitivanje integriteta površine su razne neželjene promjene koje mogu nastati na obratku uslijed obrade, a uzroci (Tablica 3.) su podijeljeni u nekoliko skupina [15]. U radu će ispitivati hrapavost površine, mikrotvrdoća te će se provesti analiza površine stereomikroskopijom.

Tablica 3. Uzroci promjene integriteta površine [15]

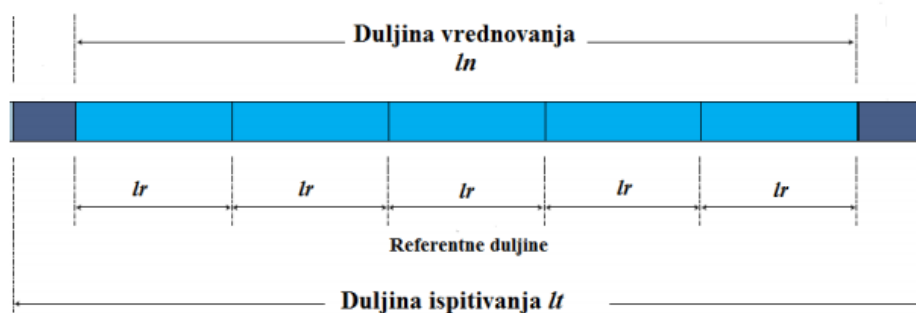
Promjene svojstava i stanja koje utječu na narušavanje integriteta površine				
MEHANIČKE	METALURŠKE	KEMIJSKE	TOPLINSKE	ELEKTRIČNE
Plastične deformacije Oštećenja u obliku kapi, srha ili pukotina (vezano za gomilanje materijala na oštirci alata) Promjene tvrdoće Pukotine (makroskopske i mikroskopske) Zaostala naprezanja u površinskom sloju (vlačna, tlačna) Uključine stranog materijala unešene u površinu za vrijeme obradbe (zrnca brusnog kola) Plastično deformirane krhotine kao rezultat brušenja Praznine, jamice, srhovi	Transformacija strukturnih faza Veličina zrna strukture i raspored Veličina i raspored precipitata Nemetalni uključci u materijalu Dvojenje strukture (<i>Twinning</i>) Rekristalizacija Nepopušteni martenzit ili previsoko popušteni martenzit Pretvorba zaostalog austenita	Interkristalna korozija Interkristalna oksidacija Preferencijalno otapanje mikrokonstituenata (npr. otapanje karbida) Smanjenje žilavosti zbog kemijske apsorpcije elemenata (npr. "vodikova bolest") Selektivno nagrizanje Napetosna korozija	Zona utjecaja topline (ZUT Heat-affected zone-HAZ) Ponovno lijevan ili ponovno deponiran materijal Ponovno skrutnut materijal Raspršene čestice ili ponovno rastopljen metal deponiran na površini	Promjena električne vodljivosti Promjena magnetskih svojstava Grijanje ili pregrijavanje zbog električnog otpora

4.1. Hrapavost površine

Hrapavost predstavlja komponentu površinske teksture kratkovalnih nepravilnosti površine uzrokovanih postupkom obrade. Hrapavost nastaje zbog izravnog djelovanja rezne oštrice alata na obradak. Hrapavošću se vrednuje kvaliteta površine te predstavlja važan podatak o kvaliteti proizvedenog strojnog dijela koji je podložan pucanju ili koroziji zbog mogućih površinskih nepravilnosti [16]. Hrapavost površine se danas uglavnom mjeri uređajima s ticalom tako da igla ticala ide po površini te se vertikalni pomak igle pretvara u električni impuls koji se daljnjom računalnom obradom pretvara u slikovni zapis [17]. Kod mjerenja hrapavosti važne su karakteristične duljine na kojima se provodi mjerenje hrapavosti (Slika

15.). Pomoću tih duljina je standardiziran proces mjerenja te se pomoću njih izražavaju parametri hrapavosti. Karakteristične duljine su:

- duljina ispitivanja l_t
- duljina vrednovanja l_n
- referentna duljina l_r . [16]



Slika 15. Karakteristične duljine [16]

Uobičajeni parametri površine koji se mjere na ovaj način su amplitudni parametri: R_a , R_z i R_p .

R_a - predstavlja srednji korak elementa profila odnosno aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije na referentnoj duljini l_r .

R_p - maksimalna visina vrha profila u odnosu na srednju liniju na referentnoj duljini l_r .

R_z - maksimalna visina neravnina tj. suma najvišeg vrha profila i najdubljeg dola profila na referentnoj duljini l_r [16].

4.2. Mikrotvrdoća

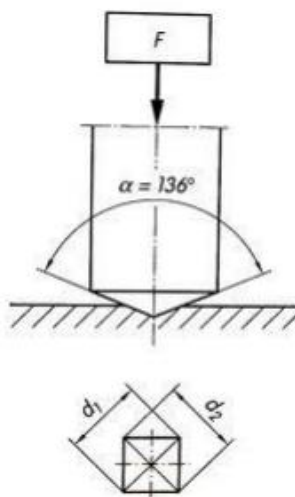
Definicija tvrdoće jest otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg materijala. Kod ispitivanja tvrdoće nije potrebno izrađivati posebne uzorke radi ispitivanja što znači da se tvrdoća može mjeriti i na gotovim proizvodima. Tri su glavne metode mjerenja tvrdoće.

- metoda Brinell
- metoda Vickers
- metoda Rockwell

Ispitivanje tvrdoće tankih uzoraka moguće je jedino metodom Vickers [18].

4.2.1. Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers

U metodi Vickers kao penetrator se koristi istostrana četverostrana piramidu s kutem između stranica 136° (Slika 16.). Prednost ove metode je što se mjerenja mogu odvijati s različitim vrstama opterećenja u najvećem mjernom opsegu tvrdoće, od mekih do vrlo tvrdih materijala [18].



Slika 16. Skica indentora i otiska Vickersove metode [19]

Vrijednost tvrdoće se određuje pomoću formule

$$HV = \frac{F}{S} \quad (1)$$

gdje je:

F -primjenjena sila, N

S -površina šuplje piramide otisnute u materijalu, mm^2

Mjernim mikroskopom se mjere dijagonale (d_1 , d_2) baze piramide koja je ostala utisnuta u materijalu, pa formula dobiva svoj konačan oblik:

$$HV = \frac{F * 0,189}{d} \quad (2)$$

gdje je:

F -primjenjena sila, N

d -srednja vrijednost duljine baznih dijagonala piramide u mm, $d = (d_1 + d_2)/2$

Sila utiskivanja indentora može se izabrati od 49 N (5 kp) do 981 N (100 kp), no smanjenjem sile do 0,098 N (10 p) mogu se mjeriti vrlo tanki uzorci pa čak i tvrdoća pojedinih kristalnih zrna. Uz simbol HV rezultatu se indeksirano pridodaje i vrijednost opterećenja u kilopondima (kp) (npr. HV5 = 400 označava da je sila utiskivanja bila 5 kp odnosno $5 \cdot 9,81$ N) [18].

4.3. Stereomikroskopija

Stereomikroskopija je mikroskopska tehnika kojom pomoću sustava leća, prstena i okulara uvećavamo objekt promatranja. Stereomikroskop je vrsta optičkog mikroskopa kojima pripada i svjetlosni mikroskop, no za razliku od običnog svjetlosnog mikroskopa zrake svjetlosti padaju direktno na objekt promatranja te se od objekta odbijaju te odlaze u optički sustav. Upravo zbog toga objekti promatranja ne moraju biti transparentni te je moguć trodimenzionalni uvid u prostorni izgled promatranog uzorka [20].

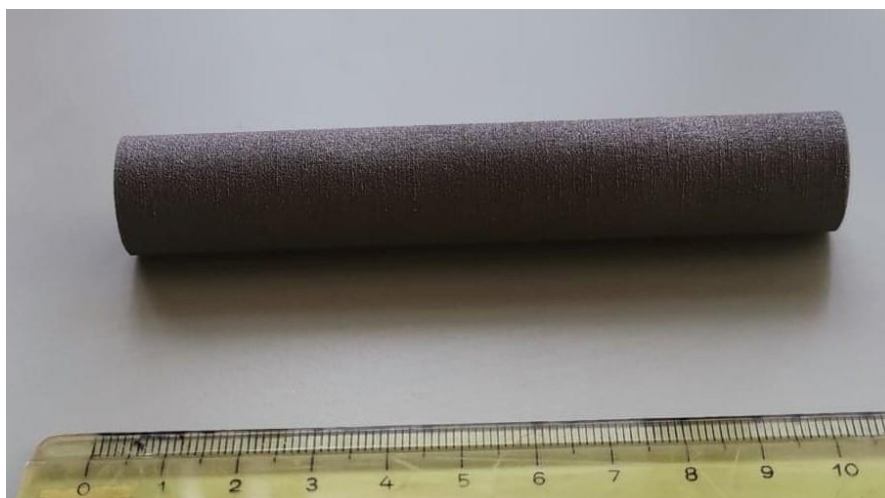
5. PRIPREMA UZORAKA I PROVEDBA ISPITIVANJA

5.1. Priprema uzoraka

Uzorak je izrađen u Institutu AIDIMME u Valenciji, Španjolska, a tehnologija izrade uzorka je pretaljivanje snopom elektrona (EBM) dok su parametri pretaljivanja snopom elektrona poslovna tajna proizvođača. Materijal uzorka je legura Ti6Al4V kemijskog sastava navedenog u tablici 4. Na slici 17 prikazan je uzorak nakon postupka EBM, prije strojne obrade.

Tablica 4. Kemijski sastav legure Ti6Al4V [21]

Element (%)	C	V	Al	O	N	H	Fe	Ti
Min.	-	3,5	5,5	-	-	-	-	Ostatak
Max.	0,08	4,5	6,75	0,2	0,05	0,015	0,3	Ostatak

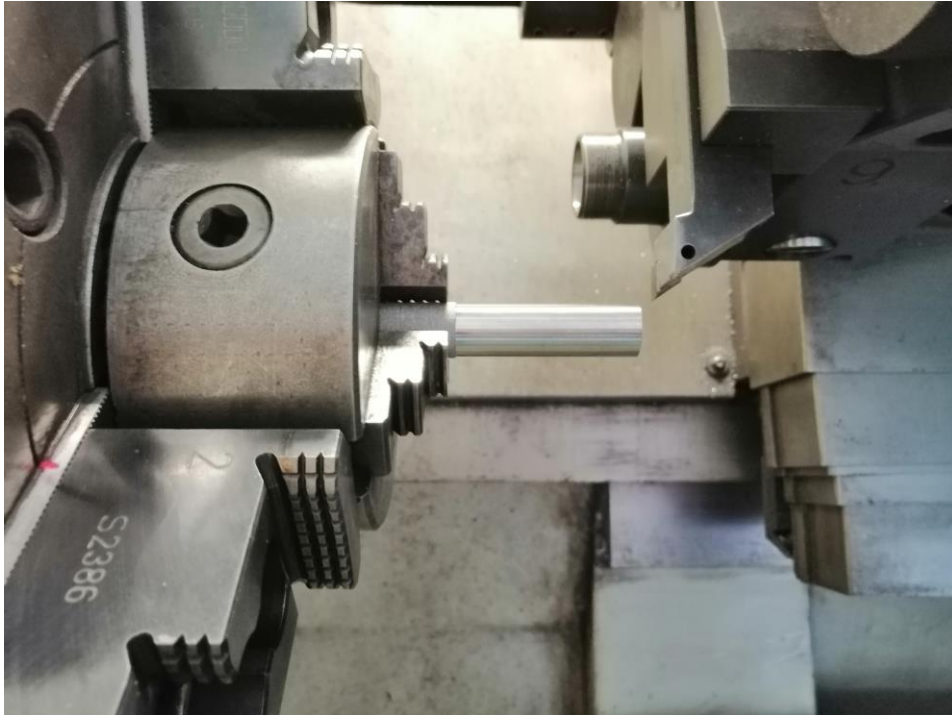


Slika 17. Uzorak legure Ti6Al4V u neobrađenom stanju proizveden postupkom EBM

Za obradu površine uzorka primijenjeno je fino tokarenje (Slika 18.). Obrada je provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za alatne strojeve uz slijedeće parametre obrade:

- Polazni promjer uzorka 18 mm
- Promjer uzorka nakon strojne obrade 17 mm.
- Rezna pločica ISCAR IC320.

- CNC uređaj TRENS TRENČIN SBL 500.
- Dubina rezanja: $A_p = 0,25$ mm
- Brzina rezanja: $V_c = 45$ mm/min
- Posmak: $f = 0,15$ mm



Slika 18. Fino tokarenje uzorka aditivno proizvedene legure Ti6Al4V

5.2. Provedba ispitivanja

5.2.1. Stereomikroskopija

Stereomikroskopija površine uzorka provedena je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zaštitu materijala. Analiza se provedena na uređaju koji pomoću Leica MZ6 koji pomoću računala i programa Leica Application suite version 3.2.0 kreira sliku u digitalnom obliku (Slika 19.).



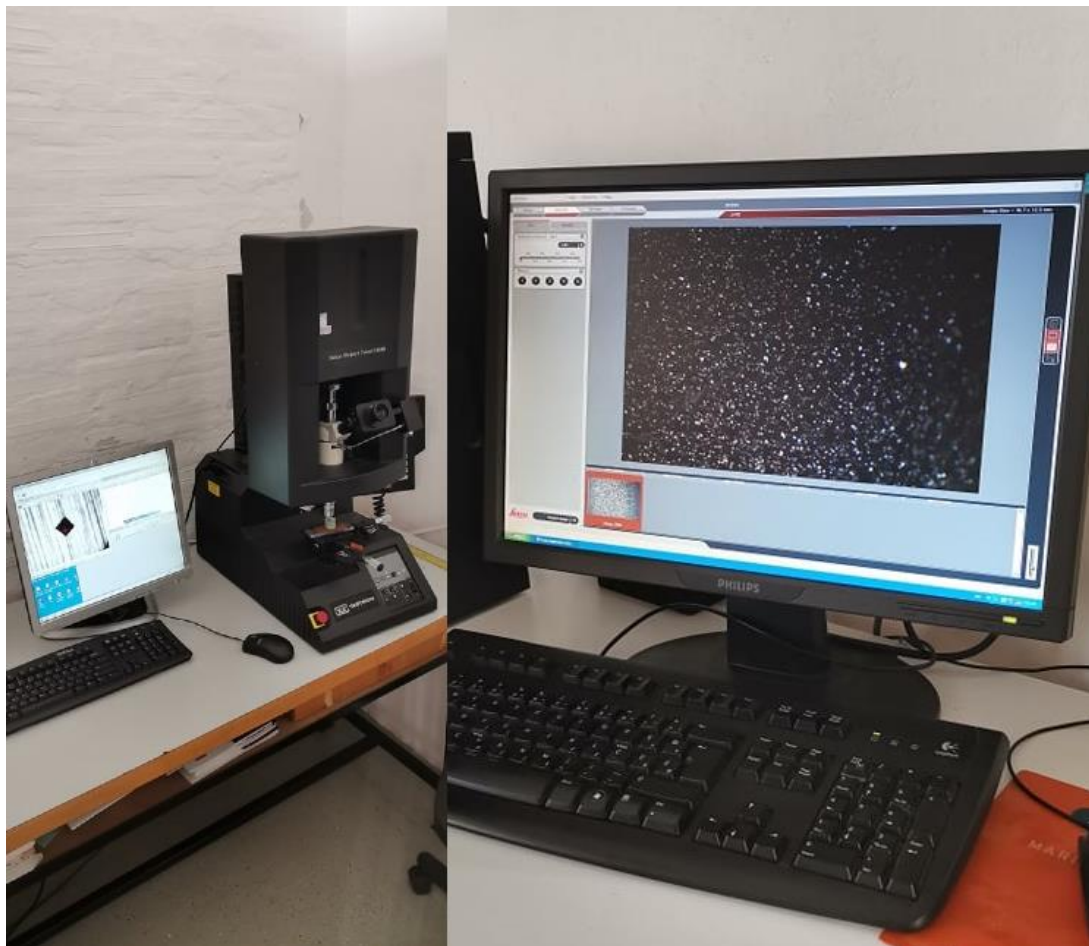
Slika 19. Stereomikroskop Leica MZ6 i računalo s programom za obradu slike s mikroskopa

5.2.2. Ispitivanje parametara hrapavosti

Ispitivanje provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Mjerenje se odvalo na uređaju s ticalom Mahr Perthen S8P. Mjereni parametri hrapavosti su R_a , R_z , R_p . Duljina ispitivanja (l_t) iznosila je 17,5 mm, duljina vrednovanja (l_n) 12,5 mm, a referentna duljina (l_r) 2,5 mm.

5.2.3. Ispitivanje mikrotvrdoće

Mikrotvrdoća je ispitana metodom Vickersa s opterećenjem od 1 kp (HV1) na mjernom uređaju Wilson-Wolpert Tukon 2100B koji pomoću sustava mikroskop-software mjeri duljinu dijagonali piramide (Slika 21.) te uz poznato opterećenje samostalno izračunava tvrdoću.



Slika 20. Uređaj Williams-Wolpert Tukon 2100B s računalnim programom za mjerenje udaljenosti dijagonala

6. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 21 prikazana je neobrađena površina uzorka. Površina je gruba i hrapava s kapljicama pretaljene i srašćene Ti6Al4V legure. Izgled površine posljedica je skrućivanje kapljica legure u EBM postupku. Na obrađenom dijelu površine (Slika 22.) jasno se vide brazde od tokarenja i područja na kojima su iz površine istrgnute djelomično srašćene kapljice legure.



Slika 21. Legura Ti6Al4V proizvedena EBM postupkom u neobrađenom stanju, povećanje x7,33



Slika 22. Legura Ti6Al4V proizvedena EBM postupkom nakon finog tokarenja, povećanje x31,3

Ispitivanjem mikrotvrdoće Ti6Al4V legure proizvedene EBM postupkom i iste legure proizvedene konvencionalnim postupcima dobivene vrijednosti prikazane u tablici 5.

Tablica 5. Mikrotvrdoća legure Ti6Al4V proizvedene EBM postupkom i konvencionalno proizvedene legure

Redni broj mjerenja	EBM legura HV1	Konvencionalo proizvedena legura HV1
1.	486	386
2.	409	391
3.	444	383
4.	441	381
5.	429	398
Srednja vrijednost	442	388

Ispitivanjem mikrotvrdoće utvrđeno je da Ti6Al4V legura proizvedena EBM postupkom ima nešto veću tvrdoću od konvencionalno proizvedene legure. Razlog tome je sitnije zrno sinterirane legure u odnosu na konvencionalno proizvedenu.

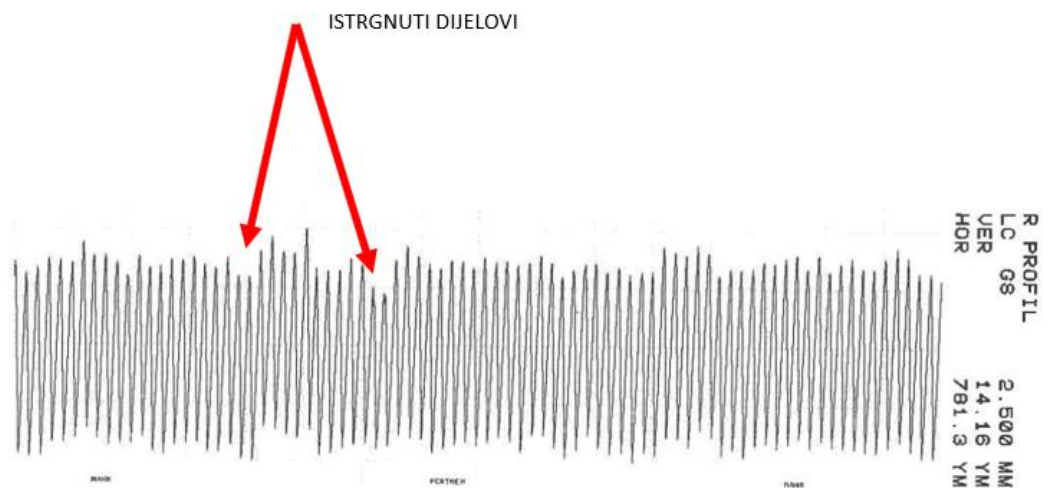
Mjerenjem hrapavosti utvrđene su vrijednosti parametara hrapavosti prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti nakon finog tokarenja legure Ti6Al4V

Parametar	Vrijednost, μm
R _a	12,60
R _z	55,09
R _p	31,51

Ispitani parametri hrapavosti pokazuju da samo fino tokarenje nije dovoljna završna obrada da bi se na obrađenoj površini mogla primijeniti tanka tvrda prevlaka. Na ispitanom profilu hrapavosti (Slika 23.) uočavaju se nepravilnosti u profilu hrapavosti, nastale kao posljedica

izvlačenja i odlamanja sinteriranih kapljica legure. Mjesta odlamanja čestica legure primjećena su na stereomikroskopskoj slici površine (slika 22)



Slika 23. Profil hrapavosti fino tokarene legure Ti6Al4V legure proizvedene postupkom EBM

7. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada su prikazane vrste i primjena titanija i njegovih legura u raznim granama industrije, osnovne karakteristike aditivnih postupaka SLS i EBM u izradi dijelova od titanijevih legura te osnovna ispitivanja integriteta površine nakon primjene aditivnih tehnologija i obrade odvajanjem čestica.

U eksperimentalnom dijelu istraživana je integritet površine legure Ti6Al4V proizvedene pretaljivanjem snopom elektrona u polaznom stanju i nakon finog tokarenja. Utvrđeno je da površina uzorka nakon finog tokarenja nešto tvrđa (442 HV1) u odnosu na površinu konvencionalno proizvedene Ti6Al4V legure (338 HV1). Finim tokarenjem proizvedena je površina srednje hrapavosti $R_a = 12,6 \mu\text{m}$, koja još nije prikladna za nanošenje tankih tvrdih prevlaka te je u budućim istraživanjima potrebno pronaći optimalne parametre završne obrade, brušenja i poliranja.

LITERATURA

- [1] Ćorić Danko, Filetin Tomislav: Materijali u zrakoplovstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] L Siva Rama Krishna et al. / International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) Finite element analysis of a fractured mandible fixed with micro plates
https://www.researchgate.net/publication/321672422_FINITE_ELEMENT_ANALYSIS_OF_A_FRACTURED_MANDIBLE_FIXED_WITH_MICRO_PLATES (7.9.2020.)
- [3] Ariyasu N., Inagaki I., Shirai Y., Takechi T.; Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry, Nippon steel & sumitomo metal technical report No. 106, July 2014. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf> (7.9.2020.)
- [4] Zhu Jianwen, Qu Henglei, Yang Jianchao, Zhang Zhi, Chen Tingting, Li Changliang, Qi Liang, Shu Ying, Ou Yang Wenbo, Yang Jian, Sun Dan ; The Application and Prospect of Titanium Materials in Marine Engineering Equipment 2011. https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ_WTCP_2011_Re-Do/V3/2011_Vol.3-6-C-The_Application.pdf (8.9.2020.)
- [5] <https://nationalinterest.org/blog/buzz/alfa-russias-race-car-submarines-were-faster-and-could-out-dive-anything-80756> (preuzeto 8.9.2020.)
- [6] Ćorić Danko: Posebni metalni materijali - predavanja, Nastavna literatura FSB, Zagreb, 2018.
- [7] <https://www.akrapovic.com/en/moto/product/14876/Yamaha/MT-07-FZ-07/2016/Racing-Line-Titanium?brandId=41&modelId=341&yearId=4125> (preuzeto 8.9.2020.)
- [8] <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/titanium/application.shtml> (8.9.2020.)
- [9] Virginia Sáenz de Viteri and Elena Fuentes (May 22nd 2013). Titanium and Titanium Alloys as Biomaterials, Tribology - Fundamentals and Advancements, Jürgen Gegner, IntechOpen, DOI: 10.5772/55860. <https://www.intechopen.com/books/tribology-fundamentals-and-advancements/titanium-and-titanium-alloys-as-biomaterials> (8.9.2020.)


- [10] Ali Khan M; Jaffery S.H.I.; Khan M.; Younas M.; Butt S.I.; Riaz A.; S. Sagheer Warsi: Statistical analysis of energy consumption, tool wear and surface roughness in machining titanium alloy (Ti-6Al-4V) under dry, wet and cryogenic conditions; Library of Delft university of technology 2019. <https://ms.copernicus.org/articles/10/561/2019/> (16.09.2020.)
- [11] Damir Godec, Mladen Šercer: Aditivna proizvodnja, Šveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [12] Trevisan F.; Calignano F.; Aversa A.; Marchese J.: Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications, Journal of applied biomaterials and fundamental materials 2017.
[https://www.researchgate.net/publication/320168704 Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field processes properties and applications](https://www.researchgate.net/publication/320168704_Additive_manufacturing_of_titanium_alloys_in_the_biomedical_field_processes_properties_and_applications) (9.9.2020.)
- [13] Polishetty A.; Shunmugavel M.; Goldberg M.; Littlefair G.; Kumar Singh R.: cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V ; International conference on sustainable materials Processing and Manufacturing SMPM, 2017.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302347> (9.9.2020.)
- [14] Milton S.; Morandea A.; Chalon F.; Leroy R.: Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by selective laser melting: 3rd CRIP conference on surface integrity 2016.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116006351> (9.9.2020.)
- [15] Burakowski, T.; Wierzchon, T.: Surface Engineering of Metals, CRC Press LLC, 1999.
- [16] Stanković M.: Zahtjevi na površinsku hrapavost nehrđajućih čelika, Repozitorij FSB-a, Zagreb 2019. (16.9.2020.)
<https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A4535/datastream/PDF/view>
- [17] Jović A.: Umjeravanje elektroničko – mehaničkog uređaja s ticalom (Surtronic 25), Repozitorij FSB-a, Zagreb 2012.
http://repozitorij.fsb.hr/1913/1/09_07_2012_Ante_Jovic.PDF (16.9.2020.)
- [18] Ivušić V.; Franz M.; Španiček Đ.; Čurković L.: Materijali I, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [19] Kovačić N.: Utjecaj mjerne sposobnosti tvrdomjera na rezultate mjerenja tvrdoće Vickers metodom, Repozitorij FSB-a, Zagreb 2013.
http://repozitorij.fsb.hr/2472/1/13_09_2013_Nikola_Kovacic.pdf (15.9.2020.)

-
- [20] <https://www.microscope.com/education-center/five-things-you-should-know/about-stereo-microscopes> (15.09.2020.)
- [21] https://www.researchgate.net/figure/Chemical-composition-according-to-ISO-5832-3-and-the-investigated-Ti6Al4V-specimens_fig6_274316781 (16.9.2020.)

PRILOZI

I. Izvještaj o ispitivanju hrapavosti površine Ti6Al4V legure

perthometer S9P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: CILINDAR NR.: 15.9.2020. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 4 T1 RHT 6-50 58 6	
LT	17.50 MM				
LM	12.50 MM				
UB	62.50 YM				

KENNWERT				STATISTIK N = 4						
	LC	GS	2.500 MM	X	S	R	MAX	MIN	NH	TH
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
	RMAX		YM	59.59	6.15	12.67	68.00	56.13		
	RZ		YM	55.09	2.90	6.42	59.36	52.94		
	RA		YM	12.60	0.13	0.31	12.76	12.45		
	RP		YM	31.51	3.68	7.50	37.00	29.42		
	RPH		YM	27.93	2.09	4.47	30.92	26.45		
	WT		YM	9.00	4.01	9.63	14.45	4.82		
	RT		YM	60.48	5.66	12.17	68.00	55.63		
	PT		YM	66.61	7.40	17.35	76.50	59.15		

